



MINISTÈRES
ÉDUCATION
JEUNESSE
SPORTS
ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
RECHERCHE

Liberté
Égalité
Fraternité

Académie de Grenoble

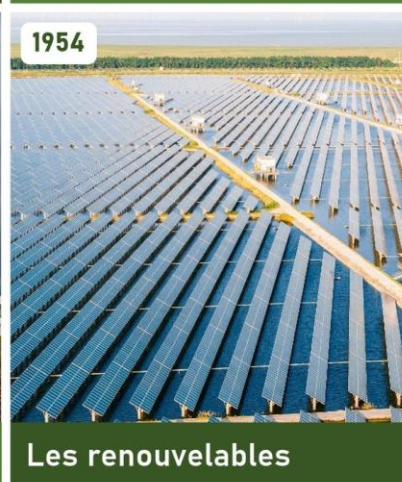
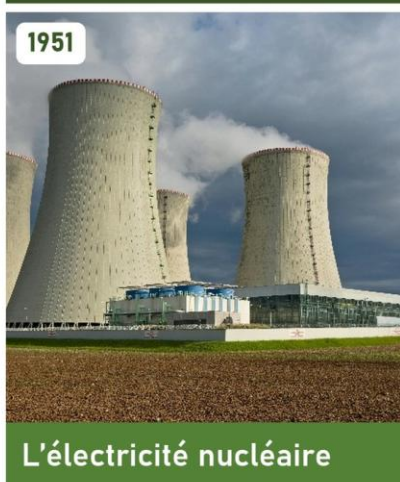
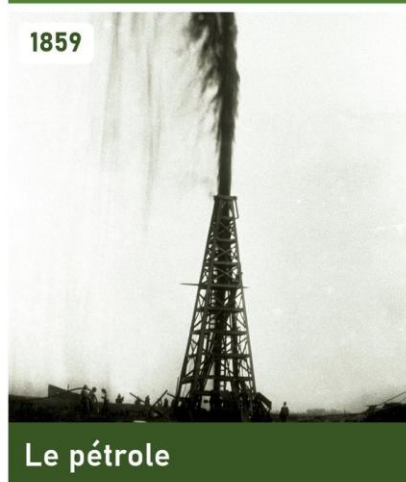
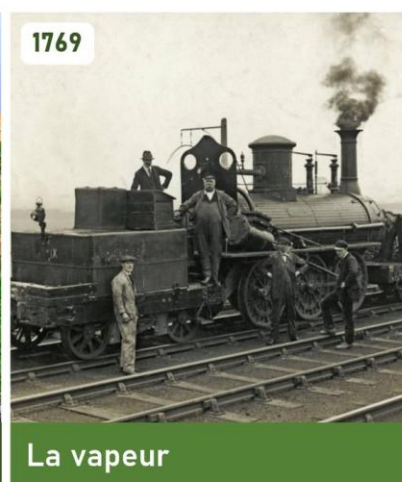
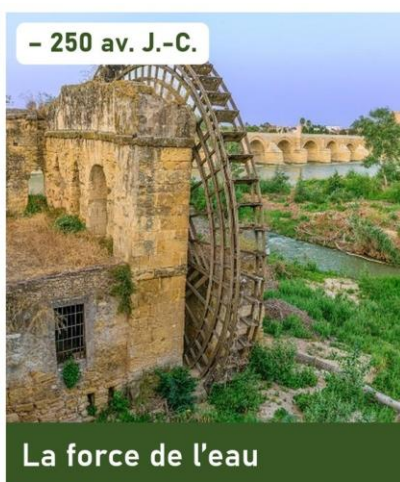
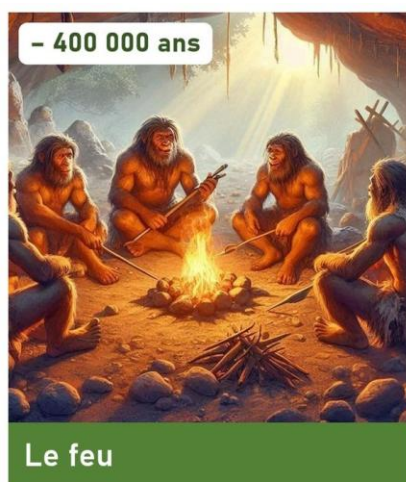
LYCEE DES METIERS LA PLÉIADE

Pont de Cheruy



Les sources d'énergie

Terminale AC – ITEC – EE – SIN



De la maîtrise du feu aux énergies renouvelables

Terminale	Les sources d'énergie		TP
Objectifs :	▪ Comprendre comment l'humanité a exploité puis converti l'énergie, de la maîtrise du feu aux énergies renouvelables. ▪ Distinguer source d'énergie, forme d'énergie et vecteur énergétique (l'électricité). ▪ Représenter une chaîne de conversion énergétique et repérer les pertes. ▪ Utiliser des données chiffrées pour comparer des solutions techniques dans une démarche de développement durable. ▪ Situer les grandes inventions et leurs inventeurs (Imhotep, Al-Battani, Al-Jazari, Watt, Faraday, Edison, Curie...) sur une frise chronologique. ▪ Dimensionner un stockage d'énergie et comparer des solutions selon leur impact carbone et leur coût (méthode attendue au bac).		
Compétences visées	Programme de 2I2D (ingénierie, innovation et développement durable), classe terminale STI2D : arrêté du 17 janvier 2019 – BO spécial n°1 du 22 janvier 2019 (NOR MENE1901591A), annexe 1. Chapitre du tronc commun aux quatre enseignements (AC, ITEC, EE, SIN). Compétences du programme (BO) : C01.1 Justifier les choix des structures matérielles et/ou logicielles d'un produit, identifier les flux mis en œuvre dans une approche de développement durable. → <i>source, forme d'énergie, vecteur énergétique</i> C01.3 Justifier les solutions constructives d'un produit au regard des performances environnementales et estimer leur impact sur l'efficacité globale. → <i>rendement, pertes, sources renouvelables ou non</i> C02.2 Évaluer la compétitivité d'un produit d'un point de vue technique et économique. → <i>comparaison chiffrée de solutions (activité 2, partie 5)</i> C03.1 Identifier et caractériser les fonctions et les constituants d'un produit ainsi que ses entrées/sorties. → <i>chaînes de conversion énergétique</i> Concrètement, l'élève saura : ▪ Identifier une source d'énergie, une forme d'énergie et un vecteur énergétique. ▪ Représenter et analyser une chaîne de conversion énergétique. ▪ Calculer une énergie, une puissance, un rendement et des pertes, en maîtrisant les unités. ▪ Comparer des solutions techniques et justifier un choix à partir de données numériques. ▪ Rédiger un calcul : relation littérale → application numérique → résultat avec unité.		
Connaissances associées (BO)	1.5.2 Mise à disposition des ressources : enjeux énergétiques mondiaux, production centralisée ou locale 1.5.3 Utilisation raisonnée des ressources : efficacité énergétique d'un produit 2.1 Représentation des flux MEI : flux et stocks d'énergie, caractérisation et unités 2.3.1 à 2.3.3 Chaînes de puissance : typologie, stockage d'énergie, conversion de puissance 3.3 Comportement énergétique des produits : conservation de l'énergie, pertes et rendements, sources d'énergie, bilan énergétique		
Durée	180 mn		
Discipline	AC – ITEC – EE – SIN		
Notation 1 Pronote	20 points – activité 1	En binôme / groupe de 3	
Notation 2 Pronote	20 points – activité 2		
Coefficient	1		

CHAPITRE

02

COURS · TERMINALE STI2D · 212D

Les sources d'énergie

Du feu de bois au mix énergétique bas carbone

LE FIL ROUGE DU CHAPITRE

• - 400 000	• - 3 500	• - 250	• 1206	• 1769	• 1831	• 1859	• 1951	• 1954	•
Le feu	Roue, voile	L'eau	Mécanisation	La vapeur	L'électricité	Le pétrole	Le nucléaire	Le solaire	Aujourd'hui Stocker

LA QUESTION DU CHAPITRE

« Comment l'humanité est-elle passée du feu de bois à un mix énergétique bas carbone ? Et comment **comparer de façon chiffrée** — énergie, rendement, coût, CO_2 — des solutions techniques aussi différentes qu'un moulin à eau, une machine à vapeur, un moteur diesel, une centrale nucléaire ou une éolienne ? »

JE SERAI CAPABLE DE...

- ☐ Distinguer **énergie primaire, finale et utile, source, forme et vecteur** d'énergie.
- ☐ Représenter une **chaîne de puissance** et réaliser un **bilan énergétique** (pertes, rendement global).
- ☐ Calculer une **énergie**, une **puissance** et un **rendement** dans tous les domaines (électrique, mécanique, thermique, hydraulique).
- ☐ Dimensionner un **stockage d'énergie** (batterie, STEP, hydrogène).
- ☐ Comparer des solutions selon leur **impact carbone** et leur **coût**, et **justifier un choix**.
- ☐ Situer les grandes **inventions** et leurs **auteurs** sur une frise chronologique.

Cochez chaque case quand la compétence est acquise.

AU PROGRAMME

- I Rappels de Première**
énergie primaire, finale, utile · chaîne de puissance · énergie et puissance · effort × flux · rendement
- II De la Préhistoire au Moyen Âge**
le feu · les muscles · l'Égypte et la Mésopotamie · l'eau et le vent · la mécanisation arabo-musulmane · la Chine
- III De la révolution industrielle à nos jours**
vapeur · électricité · pétrole · nucléaire · renouvelables · stockage · CO_2 et coût
- IV S'entraîner pour le bac**
formulaire complet · exercice type bac corrigé pas à pas

PARTIE I

Rappels de Première

RAPPEL DE PREMIÈRE

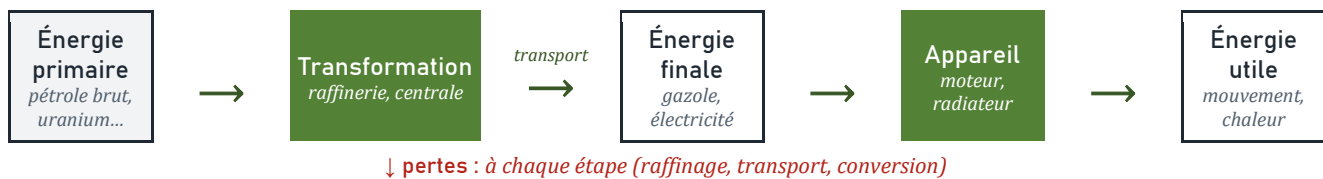
Pourquoi ces rappels ?

Ces notions ont été vues en Première. Elles sont **indispensables** pour la suite du chapitre et pour l'épreuve du bac : chaque calcul de la partie II et de la partie III les réutilise. Relisez-les jusqu'à ce qu'il n'y ait **plus aucune ambiguïté** sur les mots et les unités.

01 Énergie primaire, énergie finale, énergie utile

Une même énergie change de nom au cours de son trajet, de la nature jusqu'à l'usage. Il faut employer le **bon mot** :

ÉNERGIE	DÉFINITION	EXEMPLES
Primaire	Disponible dans la nature, avant toute transformation .	Pétrole brut, charbon, gaz, uranium, vent, soleil, eau d'un barrage
Finale	Livrée au consommateur, payée sur la facture .	Gazole à la pompe, électricité au compteur, gaz du réseau
Utile	Réellement exploitée pour le besoin.	Chaleur dans la pièce, mouvement des roues, lumière



Les **formes d'énergie** sont converties les unes dans les autres par les systèmes techniques :

FORME D'ÉNERGIE	OÙ LA TROUVE-T-ON ?	EXEMPLE DE CONVERSION
Chimique	Liaisons des molécules (bois, carburant, aliments, batteries)	Combustion → chaleur
Thermique	Agitation des particules d'un corps chaud	Vapeur → turbine
Mécanique	Mouvement (cinétique) ou position en hauteur (potentielle)	Chute d'eau → turbine
Électrique	Déplacement de charges dans un circuit	Moteur → mouvement
Rayonnante	Lumière, rayonnement solaire	Panneau photovoltaïque
Nucléaire	Noyaux des atomes (uranium 235)	Fission → chaleur

Un **vecteur énergétique** n'est **pas une source** : il **transporte** ou **stocke** l'énergie produite ailleurs. L'**électricité** est le principal vecteur ; l'**hydrogène** et la vapeur en sont d'autres.

À RETENIR

Renouvelable ou non ?

Source renouvelable : se reconstitue à l'échelle d'une vie humaine (vent, soleil, eau, biomasse bien gérée, géothermie).

Source non renouvelable : stock formé sur des millions d'années ou en quantité limitée (charbon, pétrole, gaz naturel, uranium).

PIÈGE À ÉVITER

L'électricité n'est pas une source d'énergie

On ne « trouve » pas d'électricité dans la nature : elle est **produite** à partir d'une source primaire (uranium, vent, eau, gaz...). Dire « l'énergie électrique est propre » n'a pas de sens sans préciser **comment** elle a été produite.

02 La chaîne de puissance d'un système

En 2I2D, on décrit le trajet de l'énergie dans un système par la **chaîne de puissance**. Chaque bloc a une fonction précise :



Le **principe de conservation de l'énergie** s'applique à chaque bloc et au système entier :

FORMULE

Bilan énergétique

$$E_{\text{absorbée}} = E_{\text{utile}} + E_{\text{pertes}}$$

L'énergie ne se crée pas et ne disparaît pas : elle **change de forme**. Les pertes sont presque toujours de la **chaleur**.

03 Énergie et puissance

La **puissance** indique la **rapidité** avec laquelle une énergie est transférée ou convertie. Deux machines peuvent fournir la même énergie, mais la plus puissante le fera plus vite.

FORMULE

Relation fondamentale

$$E = P \times t \quad P = \frac{E}{t}$$

E : énergie en joules (J) · **P** : puissance en watts (W) · **t** : durée en secondes (s).

Si **P** est en kilowatts (kW) et **t** en heures (h), alors **E** est en kilowattheures (kWh).

CONVERSION UTILE	VALEUR	PRÉFIXE	SIGNIFICATION
1 h	3 600 s	k (kilo)	$\times 10^3$
1 Wh	3 600 J	M (méga)	$\times 10^6$
1 kWh	$3,6 \times 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$	G (giga)	$\times 10^9$
1 MWh	1 000 kWh	T (téra)	$\times 10^{12}$

EXEMPLE RÉSOLU

La bouilloire

Une bouilloire de puissance **P = 2 kW** fonctionne pendant **3 min**. Quelle énergie consomme-t-elle ? Donner le résultat en joules puis en kWh.

a) Énergie en joules

Relation littérale $E = P \times t$ (P en W, t en s)

Application numérique $E = 2\,000 \times (3 \times 60) = 2\,000 \times 180$

Résultat **E = 360 000 J = 0,36 MJ**

b) Énergie en kWh

Relation littérale $E = P \times t$ (P en kW, t en h)

Application numérique $E = 2 \times (3 / 60) = 2 \times 0,05$

Résultat **E = 0,1 kWh**

Interprétation vérification : $0,1 \times 3,6 = 0,36 \text{ MJ}$, on retrouve le même résultat.

PIÈGE À ÉVITER

kW ≠ kWh

Le **kW** est une unité de **puissance** (un débit d'énergie) ; le **kWh** est une unité d'**énergie** (une quantité). On écrit « une plaque de 2 kW » mais « une consommation de 3 kWh ». Ne jamais écrire « 2 kW/h ».

04 Calculer une puissance dans chaque domaine : effort × flux

Dans tous les domaines de la physique, la puissance est le produit d'une grandeur d'**effort** par une grandeur de **flux**. C'est l'outil qui permet de suivre la puissance tout au long d'une chaîne :

DOMAINE	EFFORT	FLUX	PUISSANCE
Électrique	tension U (V)	intensité I (A)	$P = U \times I$
Mécanique (translation)	force F (N)	vitesse v (m/s)	$P = F \times v$
Mécanique (rotation)	couple C (N·m)	vitesse angulaire ω (rad/s)	$P = C \times \omega$
Hydraulique	pression p (Pa)	débit volumique Q_v (m³/s)	$P = p \times Q_v$

FORMULE

Vitesse de rotation

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

ω en rad/s · N en tours par minute (tr/min). Un moteur à 1 500 tr/min tourne à $\omega \approx 157 \text{ rad/s}$.

EXEMPLE RÉSOLU

Le moteur électrique d'un tapis roulant

Un moteur à courant continu est alimenté sous $U = 48 \text{ V}$ et absorbe $I = 85 \text{ A}$. Sur son arbre, on mesure un couple $C = 24 \text{ N}\cdot\text{m}$ à $N = 1\,450 \text{ tr/min}$.

a) Puissance absorbée (électrique)

Relation littérale $P_a = U \times I$

Application numérique $P_a = 48 \times 85$

Résultat $P_a = 4\,080 \text{ W}$

b) Vitesse angulaire

Relation littérale $\omega = 2\pi \times N / 60$

Application numérique $\omega = 2\pi \times 1\,450 / 60$

Résultat $\omega \approx 151,8 \text{ rad/s}$

c) Puissance utile (mécanique)

Relation littérale $P_u = C \times \omega$

Application numérique $P_u = 24 \times 151,8$

Résultat $P_u \approx 3\,644 \text{ W}$

d) Rendement et pertes

Relation littérale $\eta = P_u / P_a$; $P_{\text{pertes}} = P_a - P_u$

Application numérique $\eta = 3\,644 / 4\,080$; $P_{\text{pertes}} = 4\,080 - 3\,644$

Résultat $\eta \approx 0,89$ soit 89% ; $P_{\text{pertes}} \approx 436 \text{ W}$

Interprétation les 436 W sont dissipés en chaleur (effet Joule dans les bobinages, frottements).

05 Le rendement

Le **rendement** η (lettre grecque « êta ») mesure l'efficacité d'un convertisseur : c'est la part de l'énergie absorbée réellement transformée en énergie utile.

FORMULE

Rendement et pertes

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{absorbée}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}}$$

$$E_{\text{pertes}} = E_{\text{absorbée}} - E_{\text{utile}} = (1 - \eta) \times E_{\text{absorbée}}$$

$$\eta_{\text{global}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times \dots$$

Le rendement est **sans unité**, toujours compris entre 0 et 1 (ou entre 0 % et 100 %).

EXEMPLE RÉSOLU

La centrale thermique

Une centrale thermique comprend une chaudière ($\eta_1 = 0,90$), une turbine ($\eta_2 = 0,40$) et un alternateur ($\eta_3 = 0,97$). On veut fournir $P_u = 500 \text{ MW}$ électriques au réseau.

a) Rendement global

Relation littérale $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$

Application numérique $\eta = 0,90 \times 0,40 \times 0,97$

Résultat $\eta \approx 0,35$ soit 35%

b) Puissance absorbée (combustible)

Relation littérale $P_a = P_u / \eta$

Application numérique $P_a = 500 / 0,35$

Résultat $P_a \approx 1\,430\text{ MW}$

Interprétation il faut brûler près de 3 fois plus d'énergie qu'on n'en livre : environ 930 MW partent en chaleur.

PIÈGE À ÉVITER**Comparer ce qui est comparable**

Un rendement ne se compare qu'entre systèmes ayant le **même type d'énergie utile** et le **même périmètre** : on ne compare pas directement le rendement d'un feu (chaleur utile) à celui d'un moulin (énergie mécanique utile).

MÉTHODE**Rédiger un calcul (attendu au bac)**

- **Relation littérale** : la formule avec des lettres, par exemple $P = U \times I$.
- **Application numérique** : on remplace chaque lettre par sa valeur **dans les unités du Système international** (W, J, s, m, kg...).
- **Résultat** : la valeur avec son **unité** et un nombre raisonnable de chiffres significatifs (2 ou 3).

Avant tout calcul : **convertir** les durées (min $\rightarrow$ s ou h), les pourcentages (20 % $\rightarrow$ 0,20) et les préfixes (kW $\rightarrow$ W).

PARTIE II

De la Préhistoire au Moyen Âge

Pendant des centaines de milliers d'années, l'humanité ne dispose que de **sources renouvelables** : le bois, ses propres muscles, ceux des animaux, puis l'eau et le vent. Les puissances restent de l'ordre du **kilowatt**. Les innovations naissent sur **tous les continents** : en Afrique, au Moyen-Orient, en Égypte, en Chine, en Grèce, dans le monde arabo-musulman puis en Europe. Chacune de ces civilisations apporte une pièce du puzzle.

01 Vers – 400 000 ans : la maîtrise du feu



FIG. 1 Préhistoire : la maîtrise du feu est attestée il y a environ 400 000 ans.

Les plus anciennes traces de feu contrôlé ont été trouvées en **Afrique du Sud** (grotte de Wonderwerk, il y a environ un million d'années) ; sa maîtrise régulière est attestée vers – 400 000 ans en Afrique, au Proche-Orient et en Europe. C'est la **première grande conquête énergétique**. Elle transforme une ressource naturelle, le **bois**, en **chaleur** et en **lumière** : chauffage, cuisson des aliments, protection contre les animaux, éclairage, durcissement des pointes, puis cuisson de l'argile.



FORMULE

Combustion et échauffement

$$E = m \times PCI \quad Q = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$$

PCI : pouvoir calorifique inférieur (J/kg ou MJ/kg) · **c** : capacité thermique massique (J/(kg·°C)) · **θ** : température (°C).

EXEMPLE RÉSOLU

Faire bouillir de l'eau sur un feu de bois

On brûle $m_{\text{bois}} = 1,5 \text{ kg}$ de bois sec ($PCI = 15 \text{ MJ/kg}$) pour chauffer **5,0 kg d'eau** de 20°C à 100°C . Pour l'eau, $c = 4180 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$.

a) Énergie libérée par la combustion

Relation littérale $E = m_{\text{bois}} \times PCI$

Application numérique $E = 1,5 \times 15$

Résultat $E = 22,5 \text{ MJ} = 2,25 \times 10^7 \text{ J}$

b) Énergie reçue par l'eau

Relation littérale $Q = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$

Application numérique $Q = 5,0 \times 4180 \times (100 - 20)$

Résultat $Q = 1\,672\,000\text{ J} \approx 1,67\text{ MJ}$

c) Rendement du foyer

Relation littérale $\eta = Q / E$

Application numérique $\eta = 1,67 / 22,5$

Résultat $\eta \approx 0,074$ soit 7,4 %

Interprétation plus de 92 % de l'énergie du bois chauffe l'air ambiant et part dans les fumées : un feu ouvert est un très mauvais convertisseur.

02 À partir de – 10 000 ans : la force humaine et animale



FIG. 2 Du Néolithique au Moyen Âge : traction animale et travail humain.

Avec l'**agriculture** et la sédentarisation (Néolithique), l'énergie devient un moyen de **produire**, de **transporter** et de **construire**. Vers – 4 000 ans, la domestication du bœuf puis du cheval multiplie la puissance disponible pour labourer et tirer des charges.



FORMULE Travail et puissance mécanique

$$W = m \times g \times h \quad P = \frac{W}{t} \quad P = F \times v$$

W : travail (J) · $g = 9,81\text{ m/s}^2$ · h : hauteur (m) · F : force (N) · v : vitesse (m/s).

EXEMPLE RÉSOLU L'homme et le cheval

Un ouvrier hisse un seau de **20 kg** sur une hauteur de **4,0 m** ; il remonte un seau toutes les **10 s**. Un cheval tire une charrue avec une force **$F = 650\text{ N}$** à **$v = 1,1\text{ m/s}$** .

a) Travail fourni par l'ouvrier pour un seau

Relation littérale $W = m \times g \times h$

Application numérique $W = 20 \times 9,81 \times 4,0$

Résultat $W \approx 785\text{ J}$

b) Puissance de l'ouvrier

Relation littérale $P = W / t$

Application numérique $P = 785 / 10$

Résultat $P \approx 79\text{ W}$

c) Puissance du cheval

Relation littérale $P = F \times v$

Application numérique $P = 650 \times 1,1$

Résultat $P \approx 715 \text{ W} \approx 1 \text{ ch}$

Interprétation le cheval fournit environ 9 fois la puissance d'un homme.

d) Énergie fournie par le cheval en 8 h de travail

Relation littérale $E = P \times t$

Application numérique $E = 0,715 \text{ kW} \times 8 \text{ h}$

Résultat $E \approx 5,7 \text{ kWh}$

Interprétation au prix actuel de l'électricité ($\approx 0,25 \text{ €/kWh}$), une journée entière de travail d'un cheval vaut... environ 1,40 € !

ORDRES DE GRANDEUR**Muscles humains et animaux**

- Un être humain fournit en continu une puissance mécanique d'environ **75 à 100 W**.
- Un bœuf ou un cheval de trait fournit environ **500 à 750 W**. Le « cheval-vapeur » ($1 \text{ ch} \approx 736 \text{ W}$) a été défini par James Watt pour vendre ses machines... en les comparant aux chevaux qu'elles remplaçaient.

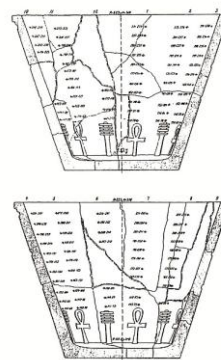
03 – 3 500 à – 1 400 : l'Égypte et la Mésopotamie, les premières machines

FIG. 3 Égypte : chadouf au bord du Nil (photographie vers 1880 ; l'outil est utilisé depuis l'Antiquité) et coupe de la clepsydre de Karnak (vers – 1400), dont les graduations intérieures indiquent les heures.

Bien avant la Grèce, les civilisations du **Nil** (Égypte) et du **Tigre et de l'Euphrate** (Mésopotamie, l'Irak actuel) inventent les **machines simples** qui multiplient la force humaine : la **roue**, le **levier**, le **plan incliné** et la **voile**. Ce sont aussi elles qui, les premières, captent l'énergie du **vent** pour naviguer et mesurent le temps avec l'**eau**.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Les premiers ingénieurs : Égypte, Mésopotamie, Afrique

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
vers – 3 500	Sumériens (Mésopotamie)	La roue , d'abord pour le potier, puis pour les chars et les charrettes.
vers – 3 500	Égyptiens	La voile : les bateaux remontent le Nil poussés par le vent. C'est la première utilisation de l' énergie éolienne .
vers – 2 650	Imhotep (Égypte)	Architecte de la pyramide à degrés de Saqqarah. Les Égyptiens déplacent des blocs de plusieurs tonnes avec leviers, rampes et plans inclinés .
vers – 2 000	Mésopotamiens et Égyptiens	Le chadouf : un levier à contrepoids pour élever l'eau d'irrigation, encore utilisé aujourd'hui.
vers – 1 400	Égypte (règne d'Amenhotep III)	Clepsydre de Karnak : la plus ancienne horloge à eau conservée.
vers – 500	Culture Nok (Nigeria)	Fourneaux pour produire le fer , parmi les plus anciens d'Afrique.

FORMULE

Moment d'une force et équilibre d'un levier

$$M = F \times d \quad F_1 \times d_1 = F_2 \times d_2$$

M : moment en N·m · **F** : force en N (pour une masse : $F = m \times g$) · **d** : distance entre l'axe et la droite d'action de la force (m).

EXEMPLE RÉSOLU

Le chadouf égyptien

Le seau rempli d'eau a une masse de **20 kg**. Il est accroché à **3,0 m** de l'axe du chadouf. De l'autre côté, un contrepoids en argile de **50 kg** est fixé à **1,2 m** de l'axe. L'ouvrier élève l'eau de **2,5 m** et vide un seau toutes les **15 s**.

a) Moment du poids du seau par rapport à l'axe

Relation littérale $M_{\text{seau}} = m \times g \times d$

Application numérique $M_{\text{seau}} = 20 \times 9,81 \times 3,0$

Résultat $M_{\text{seau}} \approx 589 \text{ N}\cdot\text{m}$

b) Moment du poids du contrepoids

Relation littérale $M_{\text{cp}} = m \times g \times d$

Application numérique $M_{\text{cp}} = 50 \times 9,81 \times 1,2$

Résultat $M_{\text{cp}} \approx 589 \text{ N}\cdot\text{m}$

Interprétation les deux moments sont égaux : le chadouf est en équilibre. L'ouvrier n'a qu'à guider le mouvement, c'est le contrepoids qui « porte » le seau.

c) Énergie fournie à l'eau pour un seau

Relation littérale $W = m \times g \times h$

Application numérique $W = 20 \times 9,81 \times 2,5$

Résultat $W \approx 490 \text{ J}$

d) Puissance utile

Relation littérale $P = W / t$

Application numérique $P = 490 / 15$

Résultat $P \approx 33 \text{ W}$

e) Volume d'eau élevé en 10 h de travail

Relation littérale $n = \text{durée} / 15 \text{ s} ; V = n \times 20 \text{ L}$

Application numérique $n = 36\,000 / 15 = 2\,400 \text{ seaux} ; V = 2\,400 \times 20 \text{ L}$

Résultat $V = 48\,000 \text{ L} = 48 \text{ m}^3 \text{ par jour}$

Interprétation de quoi irriguer un champ : sans le levier, un homme seul ne pourrait pas soulever 20 kg 2 400 fois par jour.

04 Vers – 250 av. J.-C. : la force de l'eau et du vent

FIG. 4 De l'Antiquité au Moyen Âge : moulins à eau et moulins à vent.

Les ingénieurs grecs puis romains apprennent à exploiter les **forces naturelles** : pour la première fois, une machine fournit un travail **sans muscles**. Les **moulins à eau** se répandent dans tout l'Empire romain ; les **moulins à vent** apparaissent en Perse au IX^e siècle, puis en Europe à la fin du XII^e siècle.

- **Moulins à eau** : moudre les céréales, actionner des soufflets de forge, des marteaux, des scies.
- **Moulins à vent** : entraîner des meules, pomper l'eau (assèchement des polders aux Pays-Bas).
- **Voiles des navires** : assurer la propulsion des embarcations.

**ILS ONT FAIT L'HISTOIRE****Les ingénieurs de l'Antiquité : Égypte, Grèce, Rome, Chine**

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
III ^e s. av. J.-C.	Archimède (Syracuse)	Vis d'Archimède pour élever l'eau ; principe du levier.
III ^e s. av. J.-C.	Ctésibios (Alexandrie, Égypte)	Pompe à pistons, orgue hydraulique et clepsydre à niveau réglé : il fonde l'école des mécaniciens d' Alexandrie .
III ^e s. av. J.-C.	Philon de Byzance (actif à Alexandrie)	Décrit l'une des premières roues hydrauliques.
I ^{er} s. av. J.-C.	Vitruve (Rome)	Décrit le moulin à eau à roue verticale et engrenage.
31 ap. J.-C.	Du Shi (Chine)	Soufflets de forge actionnés par une roue hydraulique pour fondre le fer.
I ^{er} s. ap. J.-C.	Héron d'Alexandrie (Égypte)	Éolipyle : une sphère mise en rotation par la vapeur. Une curiosité... qui annonce la machine à vapeur 1 700 ans plus tard.

FORMULE

Puissance de l'eau et du vent

$$P_{hyd} = \rho \times g \times Q_v \times h \quad P_{vent} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

ρ : masse volumique (eau : 1 000 kg/m³ ; air : 1,2 kg/m³) · Q_v : débit (m³/s) · h : hauteur de chute (m) · A : surface balayée (m²) · v : vitesse du vent (m/s).

EXEMPLE RÉSOLU

Le moulin à eau et le moulin à vent

Un moulin à eau reçoit un débit $Q_v = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ sous une chute $h = 2,5 \text{ m}$; sa roue a un rendement $\eta = 0,30$.

Un moulin à vent a des ailes de **20 m de diamètre** ; le vent souffle à **7,0 m/s**.

a) Puissance hydraulique disponible

Relation littérale $P_{hyd} = \rho \times g \times Q_v \times h$

Application numérique $P_{hyd} = 1\,000 \times 9,81 \times 0,30 \times 2,5$

Résultat $P_{hyd} \approx 7\,360 \text{ W}$

b) Puissance utile du moulin à eau

Relation littérale $P_u = \eta \times P_{hyd}$

Application numérique $P_u = 0,30 \times 7\,360$

Résultat $P_u \approx 2\,200 \text{ W}$

Interprétation l'équivalent de 3 chevaux ou de près de 30 hommes, jour et nuit.

c) Surface balayée par les ailes

Relation littérale $A = \pi \times R^2$

Application numérique $A = \pi \times 10^2$

Résultat $A \approx 314 \text{ m}^2$

d) Puissance du vent

Relation littérale $P_{vent} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$

Application numérique $P_{vent} = 0,5 \times 1,2 \times 314 \times 7,0^3$

Résultat $P_{vent} \approx 64\,600 \text{ W} \approx 65 \text{ kW}$

Interprétation un moulin traditionnel n'en récupère qu'environ 10 %, soit 6 à 7 kW.

À RETENIR

La limite de Betz et l'effet du cube

Une éolienne ne peut **jamais** récupérer toute la puissance du vent : sinon l'air serait arrêté derrière les pales. Le physicien allemand **Albert Betz** a démontré en **1919** que la limite théorique est **16/27 $\approx$ 59 %**.

La puissance dépend du **cube** de la vitesse : si le vent double, la puissance est multipliée par **2³ = 8**. D'où l'importance du choix du site.

05 800 – 1206 : la mécanisation dans le monde arabo-musulman

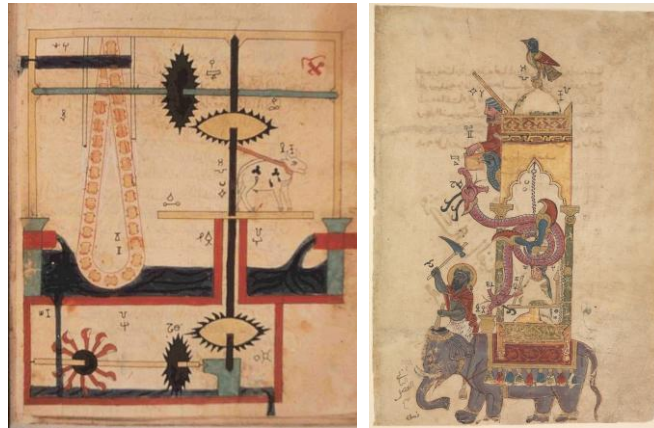


FIG. 5 Manuscrits du *Livre de la connaissance des procédés mécaniques ingénieux* d'Al-Jazari (1206) : machine élévatrice à engrenages entraînée par un animal, et horloge à éléphant.

Pendant le haut Moyen Âge européen, les savants et ingénieurs de **Bagdad**, de **Damas**, de **Haute-Mésopotamie**, d'**Al-Andalus** (Espagne, Portugal) et du **Maghreb** traduisent et annotent les traités égyptiens et grecs (Archimède, Philon, Héron), puis les dépassent en y intégrant l'**algèbre** d'Al-Khwarizmi et la **trigonométrie** d'Al-Battani. Ils construisent des pompes, des norias, des horloges hydrauliques et des **automates** : c'est la naissance de la **mécanisation**, c'est-à-dire le remplacement du geste humain par un **mécanisme qui fonctionne seul**, entraîné par l'eau ou par un animal.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Les ingénieurs du monde arabo-musulman

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
vers 820	Al-Khwarizmi (Bagdad)	Fonde l' algèbre (al-jabr) ; son nom a donné le mot « algorithme ».
vers 850	Les frères Banū Mūsā (Bagdad)	<i>Livre des procédés ingénieux</i> : une centaine de mécanismes (vannes automatiques, régulateurs de niveau) et un joueur de flûte automatique programmable .
vers 880 – 929	Al-Battani (Harran, Raqqa)	Astronome et mathématicien. Remplace les cordes de Ptolémée par le sinus , utilise le cosinus et la tangente pour calculer les mouvements de rotation des astres. Ses tables, traduites en latin, serviront jusqu'à Copernic.
IX ^e s.	Ingénieurs perses (Sistan)	Premiers moulins à vent connus, à axe vertical, pour moudre le grain et pomper l'eau : trois siècles avant l'Europe.
XII ^e – XIII ^e s.	Ingénieurs d' Al-Andalus , du Maghreb et de Syrie	Grandes norias (roues élévatrices) de Cordoue et de Hama, dont certaines sont encore visibles. Béjaïa (Algérie) est un grand foyer scientifique : le mathématicien italien Fibonacci y apprend les chiffres ghubar (« chiffres de poussière ») en usage au Maghreb et en Al-Andalus, ancêtres de nos chiffres actuels, qu'il fera connaître en Europe ; il publiera aussi la suite qui porte son nom (<i>Liber abaci</i> , 1202).
1206	Al-Jazari (Diyarbakır)	<i>Livre de la connaissance des procédés mécaniques ingénieux</i> : 50 machines décrites avec des plans précis. Pompe à pistons à double effet , système bielle-manivelle , arbre à cames , automates programmables (bateau musical), horloges à eau (horloge à éléphant). Il est considéré comme l'un des pères de la robotique .
1551	Taqi al-Din (Istanbul)	Décrit une turbine à vapeur rudimentaire qui fait tourner une broche à rôtir, un siècle et demi avant Papin.

La pompe d'Al-Jazari résume cette révolution : une roue entraînée par la rivière actionne, par un système **bielle-manivelle**, deux pistons qui aspirent et refoulent l'eau **alternativement** (double effet). Personne n'a besoin de pousser ou de tirer.



EXEMPLE RÉSOLU

La pompe à double effet d'Al-Jazari

Une roue à aubes entraîne une pompe à double effet qui élève **6,0 m³ d'eau par heure** jusqu'à un réservoir situé **h = 12 m** plus haut. Le rendement de l'ensemble roue + bielle-manivelle + pompe vaut **η = 0,40**.

a) Masse d'eau élevée en une heure

Relation littérale $m = \rho \times V$

Application numérique $m = 1\,000 \times 6,0$

Résultat **$m = 6\,000\text{ kg}$**

b) Énergie potentielle gagnée par l'eau

Relation littérale $W = m \times g \times h$

Application numérique $W = 6\,000 \times 9,81 \times 12$

Résultat **$W \approx 706\,000\text{ J} \approx 706\text{ kJ}$**

c) Puissance utile de la pompe

Relation littérale $P_u = W / t$

Application numérique $P_u = 706\,000 / 3\,600$

Résultat **$P_u \approx 196\text{ W}$**

d) Puissance que doit fournir la rivière

Relation littérale $P_a = P_u / \eta$

Application numérique $P_a = 196 / 0,40$

Résultat **$P_a \approx 490\text{ W}$**

Interprétation la machine fournit en continu le travail utile de 2 à 3 hommes, jour et nuit, sans aucun effort humain.

À RETENIR

La bielle-manivelle : un mécanisme qui traverse l'histoire

Le système **bielle-manivelle** transforme une **rotation** en **translation alternative**, ou l'inverse :

- chez **Al-Jazari** (1206) : la roue fait aller et venir les pistons de la pompe (rotation → translation) ;
- chez **James Watt** (vers 1780) : le piston fait tourner le volant de la machine (translation → rotation) ;
- dans **chaque moteur de voiture** aujourd'hui : les pistons font tourner le vilebrequin.

Un même mécanisme relie donc l'ingénieur de Diyarbakır, la révolution industrielle et l'automobile.

À RETENIR

Al-Battani : la trigonométrie, outil des rotations

Pour décrire une **rotation**, il faut relier un **angle** à des **longueurs** : c'est le rôle du sinus, du cosinus et de la tangente, dont **Al-Battani** a généralisé l'usage pour calculer le mouvement des astres. Les ingénieurs utilisent les mêmes outils pour tout ce qui tourne : manivelle, roue, rotor, alternateur.

$$x = R \times \cos \theta \quad y = R \times \sin \theta \quad v = R \times \omega$$

Un point situé à la distance **R** de l'axe, tourné d'un angle **θ**, a pour coordonnées x et y ; sa vitesse vaut $v = R \times \omega$. On retrouvera le cosinus dans la puissance électrique alternative : $P = U \times I \times \cos \varphi$.

EXEMPLE RÉSOLU

La manivelle de la pompe

La roue d'une pompe tourne à **N = 12 tr/min** et entraîne une manivelle de rayon **R = 0,15 m**. On suppose la bielle très longue : la position du piston est alors $x = R \times \cos \theta$, mesurée depuis l'axe de la roue.

a) Course du piston (distance entre ses deux positions extrêmes)

Relation littérale $c = 2 \times R$

Application numérique $c = 2 \times 0,15$

Résultat **c = 0,30 m**

b) Vitesse angulaire de la roue

Relation littérale $\omega = 2\pi \times N / 60$

Application numérique $\omega = 2\pi \times 12 / 60$

Résultat **$\omega \approx 1,26 \text{ rad/s}$**

c) Vitesse du maneton (bout de la manivelle)

Relation littérale $v = R \times \omega$

Application numérique $v = 0,15 \times 1,26$

Résultat **$v \approx 0,19 \text{ m/s}$**

d) Position du piston pour $\theta = 0^\circ, 60^\circ$ et 90°

Relation littérale $x = R \times \cos \theta$

Application numérique $x = 0,15 \times \cos 0^\circ ; 0,15 \times \cos 60^\circ ; 0,15 \times \cos 90^\circ$

Résultat **$x = 0,15 \text{ m} ; 0,075 \text{ m} ; 0 \text{ m}$**

Interprétation le piston ne se déplace pas à vitesse constante : il s'arrête aux points morts ($\theta = 0^\circ$ et 180°) et va le plus vite au milieu de sa course. D'où l'intérêt du double effet et, plus tard, du volant d'inertie de Watt.

06 Le Moyen Âge : bois, charbon de bois et métallurgie

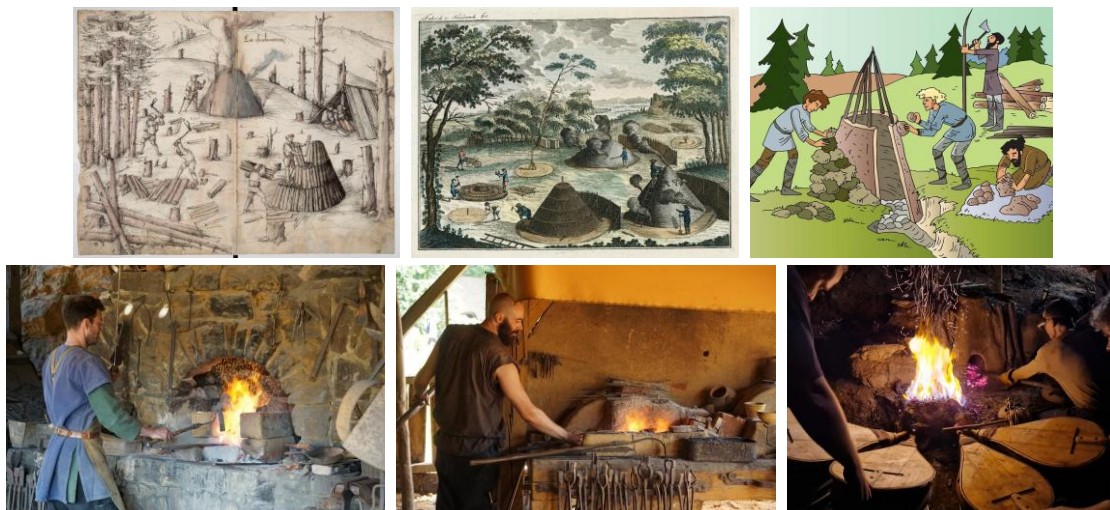


FIG. 6 Antiquité et Moyen Âge : meules de charbonnier et travail du métal à la forge.

Le bois reste la ressource essentielle, mais ses usages se diversifient : chauffage, cuisson, production de **charbon de bois** et **métallurgie**. Le charbon de bois brûle à plus haute température que le bois : il permet de **fondre et forger les métaux** et de réduire le minerai de fer. Au XVIII^e siècle, la demande est telle que les forêts d'Europe reculent fortement.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Pendant ce temps, en Chine

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
IX ^e s.	Alchimistes chinois	Poudre noire : première énergie chimique utilisée pour propulser (feux d'artifice, fusées).
XI ^e s.	Chine (dynastie Song)	La houille est déjà brûlée en grande quantité pour le chauffage et la sidérurgie, sept siècles avant l'Angleterre.
1088	Su Song (Chine)	Tour-horloge astronomique de plus de 10 m, entraînée par une roue hydraulique avec échappement et chaîne de transmission .

EXEMPLE RÉSOLU

Le bilan du charbonnier

Pour produire **1 kg de charbon de bois** (PCI = 30 MJ/kg), le charbonnier doit carboniser environ **6 kg de bois** (PCI = 15 MJ/kg).

a) Énergie contenue dans le bois utilisé

Relation littérale $E_{\text{bois}} = m \times \text{PCI}$

Application numérique $E_{\text{bois}} = 6 \times 15$

Résultat $E_{\text{bois}} = 90 \text{ MJ}$

b) Énergie contenue dans le charbon de bois obtenu

Relation littérale $E_{\text{charbon}} = m \times \text{PCI}$

Application numérique $E_{\text{charbon}} = 1 \times 30$

Résultat $E_{\text{charbon}} = 30 \text{ MJ}$

c) Rendement de la transformation

Relation littérale $\eta = E_{\text{charbon}} / E_{\text{bois}}$

Application numérique $\eta = 30 / 90$

Résultat $\eta \approx 0,33$ soit **33 %**

Interprétation on perd les deux tiers de l'énergie... mais on gagne une température de combustion bien plus élevée, indispensable à la forge.

PIÈGE À ÉVITER

Charbon de bois ≠ charbon minéral

Le **charbon de bois** est obtenu en chauffant du bois à l'abri de l'air (**pyrolyse**) : c'est un produit de la **biomasse**. La **houille** (charbon minéral) est une ressource **fossile** extraite du sous-sol ; elle deviendra déterminante avec la révolution industrielle.

07 Le bilan énergétique à la fin du Moyen Âge

SOURCE	UTILISATION PRINCIPALE	FORME D'ÉNERGIE UTILE	PUISSANCE TYPIQUE
Bois	Chauffage, cuisson, artisanat	Thermique	quelques kW
Force humaine	Travail manuel, construction	Mécanique	≈ 100 W
Force animale	Agriculture, traction, transport	Mécanique	≈ 500 à 750 W
Eau	Moulins et mécanismes	Mécanique	1 à 5 kW
Vent	Moulins et navigation	Mécanique	0,5 à 5 kW
Charbon de bois	Forge et métallurgie	Thermique	quelques kW

SYNTHÈSE

Ce qu'il faut retenir de la partie II

Pendant des millénaires, l'humanité exploite des sources **renouvelées par les cycles naturels** (biomasse, eau, vent) ou issues de l'alimentation, utilisées directement sous forme de chaleur ou de travail mécanique.

L'**Égypte** et la **Mésopotamie** inventent les machines simples (roue, levier, voile, chadouf) ; **Alexandrie** devient le premier centre de la mécanique ; la **Chine** maîtrise très tôt la roue hydraulique et la houille.

Entre le IX^e et le XIII^e siècle, les savants et ingénieurs du monde arabo-musulman inventent la **mécanisation** (pompes à double effet, cames, bielle-manivelle, automates programmables) et lui donnent ses outils mathématiques : l'**algèbre** et la **trigonométrie**.

Les puissances restent **faibles** (quelques kilowatts au maximum), **non transportables** et dépendantes des saisons, de la géographie et des ressources locales.

PARTIE III

De la révolution industrielle à nos jours

En trois siècles, la puissance disponible pour une seule machine passe du kilowatt au **gigawatt**. Chaque étape est portée par des **inventeurs** qui ont su convertir une nouvelle source d'énergie en travail utile. Si la révolution industrielle démarre en Europe, le XX^e et le XXI^e siècle sont ceux du **monde entier** : Bakou, Moyen-Orient, Sahara, Brésil, Chine, Maroc...

01 1712 – 1769 : le charbon et la machine à vapeur



FIG. 7 XVIII^e – XIX^e siècles : machine de Watt, locomotive et machinerie industrielle.

Au début du XVIII^e siècle, les mines de charbon anglaises sont inondées : il faut **pomper l'eau** au fond des puits. C'est pour résoudre ce problème que naît la machine à vapeur. Pour la première fois, on convertit de l'**énergie thermique** en **travail mécanique**, partout où l'on dispose de combustible : c'est le début de la **révolution industrielle**.

► L'évolution de la machine à vapeur, d'inventeur en inventeur

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

De Papin à Watt : une machine qui s'améliore

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
1690	Denis Papin (France)	Premier modèle à piston mû par la vapeur. Il avait déjà inventé l'autocuisseur et la soupape de sûreté (1679).
1698	Thomas Savery (Angleterre)	Première pompe à vapeur pour les mines, sans piston : dangereuse et peu efficace.
1712	Thomas Newcomen (Angleterre)	Machine « atmosphérique » à piston et balancier : le cylindre est refroidi à chaque coup. Rendement ≈ 0,5 à 1 % .
1769	James Watt (Écosse)	Brevet du condenseur séparé : le cylindre reste chaud, la consommation de charbon est divisée par 3 à 4. Puis double effet, système bielle-manivelle (déjà décrit par Al-Jazari en 1206) pour produire une rotation , régulateur à boules. Rendement ≈ 2 à 4 % .
1769	Nicolas-Joseph Cugnot (France)	Fardier à vapeur : premier véhicule automobile de l'histoire.
1804 – 1829	Richard Trevithick, George et Robert Stephenson	Premières locomotives ; la Rocket (1829) lance le chemin de fer.
1824	Sadi Carnot (France)	Montre que le rendement d'une machine thermique est forcément limité : il dépend des températures de la source chaude et de la source froide.

À RETENIR

Pourquoi l'unité de puissance s'appelle le watt

En hommage à **James Watt**, l'unité de puissance du Système international porte son nom depuis 1889 : **1 W = 1 J/s**. Watt avait lui-même défini le **cheval-vapeur** pour comparer ses machines aux chevaux qu'elles remplaçaient dans les mines.

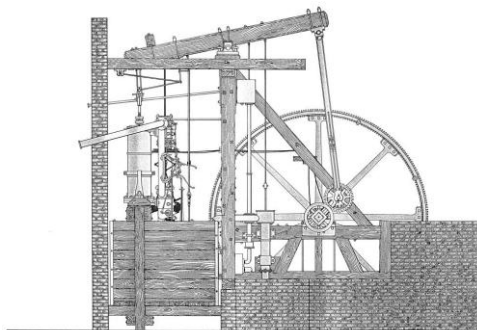
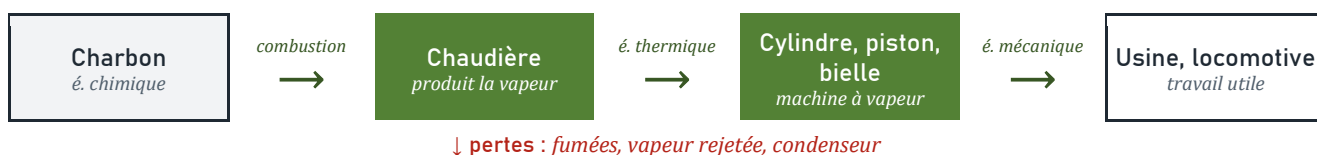


FIG. 8 La machine de Watt : balancier, cylindre, volant d'inertie et régulateur à boules.



EXEMPLE RÉSOLU

Combien de charbon pour une machine de Watt ?

Une machine de Watt fournit une puissance utile $P_u = 7,5 \text{ kW}$ ($\approx 10 \text{ ch}$) pendant une journée de **12 h**. Son rendement est $\eta = 3 \%$; la houille a un PCI de **29 MJ/kg**.

a) Énergie utile fournie dans la journée

Relation littérale $E_u = P_u \times t$

Application numérique $E_u = 7,5 \text{ kW} \times 12 \text{ h} = 90 \text{ kWh} = 90 \times 3,6$

Résultat $E_u = 324 \text{ MJ}$

b) Énergie absorbée (charbon brûlé)

Relation littérale $E_a = E_u / \eta$

Application numérique $E_a = 324 / 0,03$

Résultat $E_a = 10\,800 \text{ MJ}$

c) Masse de charbon nécessaire

Relation littérale $m = E_a / \text{PCI}$

Application numérique $m = 10\,800 / 29$

Résultat $m \approx 370 \text{ kg de charbon par jour}$

Interprétation avec la machine de Newcomen ($\eta \approx 1 \%$), il en aurait fallu plus d'une tonne : c'est l'argument de vente de Watt.

LA MACHINE À VAPEUR

Avantages	Le mouvement ne dépend plus d'un cours d'eau ni du vent ; essor des usines, des mines et du chemin de fer.
Limites	Rendement très faible (1 % chez Newcomen, quelques % chez Watt, 10 à 15 % à la fin du XIX ^e siècle) ; consommation massive de charbon ; fumées et émissions de CO ₂ .

02 1800 – 1882 : l'électricité, nouveau vecteur d'énergie

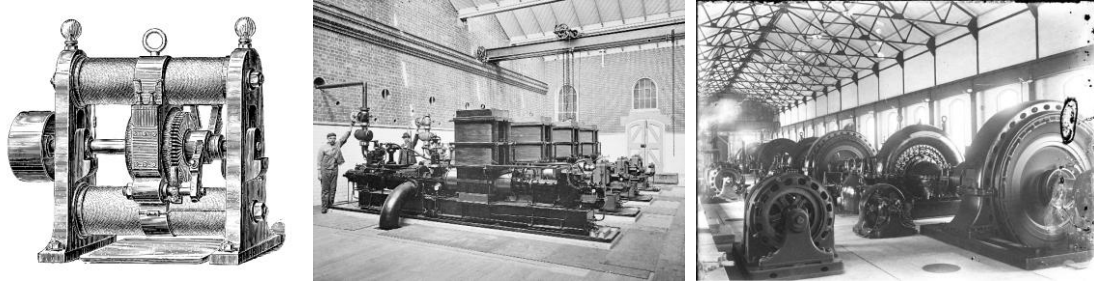


FIG. 9 XIX^e siècle : dynamos, générateurs et premières centrales électriques.

Au XIX^e siècle, les savants découvrent les lois de l'électricité et du magnétisme ; les ingénieurs en font une industrie. L'électricité n'est **pas une source** : c'est un **vecteur** qui permet de **transporter** l'énergie et de **séparer le lieu de production du lieu d'utilisation**.

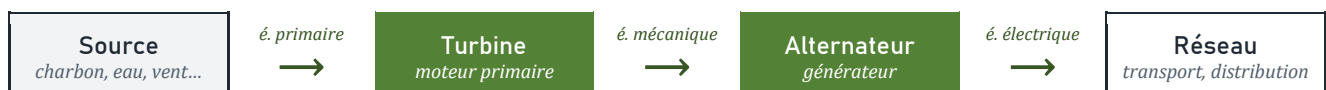
ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Du laboratoire au réseau électrique

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
1800	Alessandro Volta (Italie)	Pile électrique : premier générateur de courant continu. Unité : le volt .
1820 – 1827	André-Marie Ampère (France), Georg Ohm (Allemagne)	Lois de l'électrodynamique et loi d'Ohm $U = R \times I$. Unités : l' ampère et l' ohm .
1831	Michael Faraday (Angleterre)	Induction électromagnétique : un aimant en mouvement crée un courant. C'est le principe de tous les alternateurs et transformateurs actuels.
1840 – 1845	James Prescott Joule (Angleterre)	Montre que chaleur et travail sont deux formes de la même énergie ; loi de l'effet Joule. Unité : le joule .
1869	Zénobe Gramme (Belgique, à Paris)	Dynamo industrielle : production continue d'électricité en grande quantité.
1869	Aristide Bergès (Isère)	Conduite forcée de 200 m à Lancey, près de Grenoble : il popularise la « houille blanche », l'hydroélectricité.
1879 – 1882	Thomas Edison (États-Unis)	Lampe à incandescence durable, puis première centrale électrique commerciale à New York (1882).
1881	Lewis Latimer (États-Unis)	Ingénieur afro-américain : améliore le filament de carbone des lampes, plus durable et moins cher.
1886 – 1888	Nikola Tesla (né en Croatie actuelle), George Westinghouse	Moteur à induction et réseaux en courant alternatif : grâce au transformateur, on peut transporter l'électricité sous haute tension.

► Le générateur et le moteur électrique

L'**alternateur** convertit une énergie **mécanique** en énergie **électrique** ; il peut être entraîné par une turbine à vapeur, une turbine hydraulique, une turbine à gaz ou une éolienne. Le **moteur électrique** réalise la conversion inverse, avec un excellent rendement (**85 à 95 %**).



FORMULE

Puissance électrique et pertes en ligne

$$P = U \times I \quad P = U \times I \times \cos \varphi \quad P_J = R \times I^2$$

Continu : $P = U \times I$ · **Alternatif monophasé** : $P = U \times I \times \cos \varphi$ ($\cos \varphi$: facteur de puissance) · **Pertes par effet Joule** dans une ligne de résistance R .

EXEMPLE RÉSOLU

Pourquoi transporter l'électricité en haute tension ?

On transporte $P = 10 \text{ MW}$ dans une ligne de résistance $R = 4,0 \, \Omega$. On compare deux tensions : **20 kV** et **400 kV** (on prend $\cos \varphi = 1$).

a) Intensité et pertes sous 20 kV

Relation littérale $I = P / U$; $P_J = R \times I^2$

Application numérique $I = 10 \times 10^6 / 20 \times 10^3 = 500 \text{ A}$; $P_J = 4,0 \times 500^2$

Résultat $P_J = 1\,000\,000 \text{ W} = 1 \text{ MW}$, soit **10 %** de la puissance transportée

b) Intensité et pertes sous 400 kV

Relation littérale $I = P / U$; $P_J = R \times I^2$

Application numérique $I = 10 \times 10^6 / 400 \times 10^3 = 25 \text{ A}$; $P_J = 4,0 \times 25^2$

Résultat $P_J = 2\,500 \text{ W}$, soit **0,025 %**

c) Conclusion

Interprétation multiplier la tension par 20 divise l'intensité par 20 et les pertes par $20^2 = 400$. C'est tout l'intérêt du transformateur et du courant alternatif défendu par Tesla et Westinghouse.

EXEMPLE RÉSOLU

Le coût d'un radiateur électrique

Un radiateur de **2,0 kW** fonctionne **6 h par jour** pendant **120 jours** d'hiver. Le kWh coûte **0,25 €**.

a) Énergie consommée sur l'hiver

Relation littérale $E = P \times t$

Application numérique $E = 2,0 \text{ kW} \times (6 \times 120) \text{ h}$

Résultat $E = 1\,440 \text{ kWh}$

b) Coût

Relation littérale $\text{Coût} = E \times \text{prix du kWh}$

Application numérique $\text{Coût} = 1\,440 \times 0,25$

Résultat $\text{Coût} = 360 \text{ €}$

03 1859 : le pétrole et le moteur à combustion interne

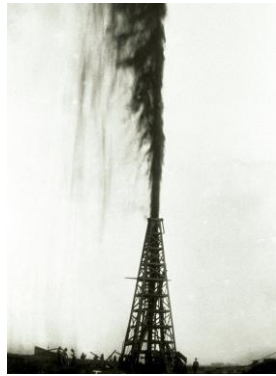


FIG. 10 Le puits jaillissant de Spindletop (Texas, 1901) : le pétrole devient abondant et bon marché.



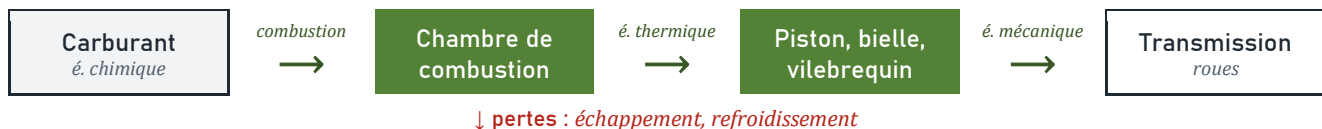
FIG. 11 Fin XIX^e – XX^e siècles : premiers véhicules à moteur, moteur thermique et industrie pétrolière.

Le pétrole et le gaz sont connus depuis l'Antiquité : bitume en Mésopotamie, forages au bambou en Chine. Les premiers puits de pétrole modernes sont forés à **Bakou** (Azerbaïdjan) en **1846**, puis en **1859** par **Edwin Drake** en Pennsylvanie, qui lance l'industrie pétrolière. D'abord utilisé pour l'éclairage (pétrole lampant), le pétrole devient au XX^e siècle la **première source d'énergie mondiale** grâce au **moteur à combustion interne**, où le carburant brûle **dans le moteur lui-même**.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Du puits de pétrole à l'automobile

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
I ^{er} s. av. J.-C.	Ingénieurs chinois (Sichuan)	Forages au bambou pour extraire la saumure ; le gaz naturel qui remonte est brûlé pour évaporer l'eau salée.
1846	Puits de Bakou (Azerbaïdjan)	Premier puits de pétrole foré.
1859	Edwin Drake (États-Unis)	Premier puits commercial américain : début de l'industrie pétrolière.
1860	Étienne Lenoir (France)	Premier moteur à combustion interne commercialisé (au gaz).
1862 – 1876	Alphonse Beau de Rochas (France), Nikolaus Otto (Allemagne)	Cycle à quatre temps (admission, compression, combustion-détente, échappement), puis premier moteur 4 temps fiable.
1886	Carl Benz (Allemagne)	Première automobile à moteur à essence commercialisée.
1893 – 1897	Rudolf Diesel (Allemagne)	Moteur à allumage par compression : meilleur rendement que le moteur à essence.



EXEMPLE RÉSOLU

L'énergie consommée par une voiture diesel

Une voiture diesel consomme **5,0 L aux 100 km**. Gazole : masse volumique **0,84 kg/L**, PCI = **43 MJ/kg** ; la combustion d'un litre émet **2,65 kg de CO₂**. Rendement du moteur : **$\eta = 0,30$** .

a) Masse de gazole consommée aux 100 km

Relation littérale $m = \rho \times V$

Application numérique $m = 0,84 \times 5,0$

Résultat **$m = 4,2 \text{ kg}$**

b) Énergie chimique consommée

Relation littérale $E = m \times \text{PCI}$

Application numérique $E = 4,2 \times 43 = 180,6 \text{ MJ} = 180,6 / 3,6 \text{ kWh}$

Résultat **$E \approx 181 \text{ MJ} \approx 50 \text{ kWh}$ aux 100 km**

c) Énergie mécanique utile

Relation littérale $E_u = \eta \times E$

Application numérique $E_u = 0,30 \times 50$

Résultat **$E_u \approx 15 \text{ kWh}$**

Interprétation 35 kWh sur 50 partent en chaleur (échappement, radiateur).

d) Émissions de CO₂

Relation littérale $m_{\text{CO}_2} = V \times 2,65$

Application numérique $m_{\text{CO}_2} = 5,0 \times 2,65 = 13,25 \text{ kg pour 100 km}$

Résultat **$\approx 133 \text{ g de CO}_2 \text{ par km}$**

AVANTAGES	LIMITES
Très forte énergie massique (gazole ≈ 43 MJ/kg ≈ 12 kWh/kg, contre $\approx 0,2$ kWh/kg pour une batterie lithium-ion)	Émissions de CO ₂ (gaz à effet de serre)
Grande autonomie, ravitaillement rapide	Polluants atmosphériques (NO _x , particules)
Forte puissance dans un volume compact	Ressource fossile non renouvelable
Réseau de distribution déjà en place	Rendement limité (25 à 40 %)

04 1951 : l'électricité nucléaire



FIG. 12 Centrales nucléaires : tours de refroidissement, salle des machines, vue d'ensemble.

Le nucléaire naît dans les laboratoires de physique, en grande partie en France. Le **20 décembre 1951**, le réacteur expérimental EBR-I (Idaho, États-Unis) produit pour la première fois de l'électricité d'origine nucléaire : il allume quatre ampoules. En France, la première électricité nucléaire est produite à **Marcoule en 1956**.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Des laboratoires aux centrales

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
1896	Henri Becquerel (France)	Découvre la radioactivité de l'uranium. Unité : le becquerel .
1898	Pierre et Marie Curie (France)	Découvrent le polonium et le radium ; Marie Curie reçoit deux prix Nobel (1903 et 1911).
1900 – 1905	Henri Poincaré (France), Albert Einstein (Allemagne)	Poincaré relie l'énergie du rayonnement à une masse (1900) ; Einstein généralise $E = m \times c^2$ (1905) : une petite perte de masse libère une énergie énorme.
1938 – 1939	Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner	Découverte et explication de la fission du noyau d'uranium.
1939	Frédéric Joliot-Curie (France)	Montre que la fission libère des neutrons : la réaction en chaîne est possible.
1942	Enrico Fermi (Chicago)	Première réaction en chaîne contrôlée dans une pile atomique.
1954	Centrale d' Obninsk (URSS)	Première centrale nucléaire raccordée à un réseau électrique.

Dans une centrale, la **fission** de noyaux d'« uranium 235 » libère une énergie considérable : **1 g - u235** fissionné libère environ **8×10^{10} J**. Cette chaleur produit de la vapeur qui entraîne une turbine couplée à un alternateur : c'est une **machine à vapeur moderne**, héritière de Watt et Carnot.



FORMULE

Facteur de charge

$$FC = \frac{E_{réelle}}{P_{nominale} \times t}$$

Compare la production réelle sur une période à la production maximale possible. Sur un an : $t = 8\,760$ h.

EXEMPLE RÉSOLU

Un réacteur de 900 MW

Un réacteur fournit $P_e = 900$ MW électriques avec un rendement $\eta = 33$ %. Sur une année, son facteur de charge est $FC = 0,75$. Données : 1 g d'uranium 235 libère $8,0 \times 10^{10}$ J ; la houille a un PCI de 29 MJ/kg.

a) Puissance thermique du réacteur

Relation littérale $P_{th} = P_e / \eta$

Application numérique $P_{th} = 900 / 0,33$

Résultat $P_{th} \approx 2\,730$ MW

b) Énergie électrique produite en un an

Relation littérale $E_e = FC \times P_e \times t$

Application numérique $E_e = 0,75 \times 900 \text{ MW} \times 8\,760 \text{ h}$

Résultat $E_e \approx 5,9 \times 10^6 \text{ MWh} = 5,9 \text{ TWh}$

c) Énergie thermique libérée en un an

Relation littérale $E_{th} = E_e / \eta$

Application numérique $E_{th} = 5,9 / 0,33 \approx 17,9 \text{ TWh} = 17,9 \times 10^{12} \times 3\,600 \text{ J}$

Résultat $E_{th} \approx 6,45 \times 10^{16} \text{ J}$

d) Masse d'uranium 235 fissionnée

Relation littérale $m = E_{th} / 8,0 \times 10^{10}$

Application numérique $m = 6,45 \times 10^{16} / 8,0 \times 10^{10}$

Résultat $m \approx 8,1 \times 10^5 \text{ g} \approx 0,8 \text{ tonne}$

e) Masse de charbon équivalente

Relation littérale $m = E_{th} / \text{PCI}$

Application numérique $m = 6,45 \times 10^{16} / 29 \times 10^6$

Résultat $m \approx 2,2 \times 10^9 \text{ kg} \approx 2,2 \text{ millions de tonnes}$

Interprétation moins d'une tonne d'uranium remplace plus de deux millions de tonnes de charbon.

Les centrales nucléaires produisent beaucoup d'électricité, de façon **pilotable** et avec de **très faibles émissions de CO₂**, mais posent des questions de **déchets radioactifs**, de **sûreté**, de **coût** et de besoins en **eau de refroidissement**.

05 1954 : l'essor des énergies renouvelables électriques



FIG. 13 Éoliennes, centrale solaire photovoltaïque et barrage hydroélectrique.

Le soleil, le vent et l'eau étaient déjà utilisés dans l'Antiquité. La nouveauté du XX^e siècle est de les convertir **directement en électricité**. Les crises pétrolières (1973, 1979) puis la lutte contre le **réchauffement climatique** accélèrent leur développement.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Convertir le soleil et le vent en électricité

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
1839	Edmond Becquerel (France)	Découvre l' effet photovoltaïque : la lumière crée une tension dans certains matériaux.
1887 – 1888	James Blyth (Écosse), Charles Brush (États-Unis)	Premières éoliennes produisant de l'électricité.
1891	Poul la Cour (Danemark)	Étudie scientifiquement les éoliennes : le Danemark devient pionnier.
1954	Chapin, Fuller et Pearson (Bell Labs)	Première cellule photovoltaïque au silicium utilisable (rendement $\approx 6\%$).
1966	EDF	Usine marémotrice de la Rance (Bretagne), la première au monde.
1984	Barrage d' Itaipu (Brésil – Paraguay)	Centrale hydraulique de 14 GW, longtemps la plus productive du monde.
2012	Barrage des Trois-Gorges (Chine)	Plus grande centrale électrique du monde : 22,5 GW.
2016 – 2018	Noor Ouarzazate (Maroc)	L'un des plus grands complexes solaires du monde (≈ 580 MW).
aujourd'hui	Chine	Premier producteur mondial de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes et de batteries.

SOURCE	PRINCIPE DE CONVERSION	PARTICULARITÉ
Éolien	Vent $\rightarrow$ é. mécanique $\rightarrow$ électricité	Variable selon le vent
Solaire photovoltaïque	Rayonnement $\rightarrow$ électricité	Dépend de l'ensoleillement, nulle la nuit
Solaire thermique	Rayonnement $\rightarrow$ chaleur	Production d'eau chaude
Hydraulique	Eau $\rightarrow$ é. mécanique $\rightarrow$ électricité	Pilotable, dépend du débit et de la chute
Biomasse	É. chimique $\rightarrow$ chaleur ou électricité	Renouvelable si la ressource est bien gérée
Géothermie	Chaleur du sous-sol $\rightarrow$ chaleur ou électricité	Dépend du sous-sol

EXEMPLE RÉSOLU

Une éolienne terrestre

Une éolienne a un rotor de **120 m de diamètre**. Le vent souffle à **10 m/s** ($\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$). Son coefficient de puissance réel est **$C_p = 0,44$** ; sur l'année, son facteur de charge est **$FC = 0,24$** .

a) Surface balayée

Relation littérale $A = \pi \times R^2$

Application numérique $A = \pi \times 60^2$

Résultat $A \approx 11\,300 \text{ m}^2$

b) Puissance du vent

Relation littérale $P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$

Application numérique $P_{\text{vent}} = 0,5 \times 1,2 \times 11\,300 \times 10^3$

Résultat $P_{\text{vent}} \approx 6,8 \times 10^6 \text{ W} = 6,8 \text{ MW}$

c) Puissance maximale selon BetzRelation littérale $P_{\max} = 0,59 \times P_{\text{vent}}$ Application numérique $P_{\max} = 0,59 \times 6,8$ Résultat $P_{\max} \approx 4,0 \text{ MW}$ **d) Puissance électrique réelle**Relation littérale $P_e = C_p \times P_{\text{vent}}$ Application numérique $P_e = 0,44 \times 6,8$ Résultat $P_e \approx 3,0 \text{ MW}$ (puissance nominale)**e) Production annuelle**Relation littérale $E = FC \times P_e \times t$ Application numérique $E = 0,24 \times 3,0 \text{ MW} \times 8\,760 \text{ h}$ Résultat $E \approx 6\,300 \text{ MWh} = 6,3 \text{ GWh}$

Interprétation avec une consommation moyenne de 4,5 MWh par foyer et par an, cela alimente environ 1 400 foyers.

EXEMPLE RÉSOLU**Des panneaux photovoltaïques sur un toit**

Un panneau de $1,7 \text{ m}^2$ a un rendement $\eta = 21 \%$. Aux conditions standard, l'éclairement vaut $G = 1\,000 \text{ W/m}^2$. Une installation compte **10 panneaux** ; en France, **1 kW crête produit environ 1 200 kWh par an**.

a) Puissance crête d'un panneauRelation littérale $P_c = \eta \times G \times S$ Application numérique $P_c = 0,21 \times 1\,000 \times 1,7$ Résultat $P_c \approx 357 \text{ W}$ **b) Production annuelle de l'installation**Relation littérale $E = 10 \times P_c \times 1\,200$ Application numérique $E = 10 \times 0,357 \times 1\,200$ Résultat $E \approx 4\,280 \text{ kWh par an}$ **c) Facteur de charge**Relation littérale $FC = E / (P \times t)$ Application numérique $FC = 4\,280 / (3,57 \times 8\,760)$ Résultat $FC \approx 0,14$ soit **14 %**

Interprétation la nuit, les nuages et l'hiver expliquent ce faible facteur de charge.

ORDRES DE GRANDEUR**Facteurs de charge en France**

Éolien terrestre $\approx 20 \text{ à } 25 \%$ · photovoltaïque $\approx 13 \text{ à } 15 \%$ · hydraulique $\approx 25 \text{ à } 35 \%$ · nucléaire $\approx 60 \text{ à } 75 \%$ selon les années.

06 Aujourd'hui : stocker l'énergie

Le vent et le soleil sont **intermittents**, alors que le réseau électrique doit respecter à chaque instant l'équilibre **production = consommation**. Il faut donc **stocker** l'énergie quand elle est abondante pour la restituer quand on en a besoin. Le stockage est aussi la clé des véhicules électriques.

ILS ONT FAIT L'HISTOIRE

Les pionniers du stockage

DATE	QUI ?	CE QU'IL OU ELLE A APPORTÉ
1839	William Grove (Angleterre)	Première pile à combustible : hydrogène + oxygène → électricité + eau.
1859	Gaston Planté (France)	Accumulateur plomb-acide rechargeable, toujours utilisé dans les voitures.
1980 – 1991	J. Goodenough, S. Whittingham, A. Yoshino	Batterie lithium-ion , commercialisée en 1991 ; prix Nobel de chimie 2019.

TECHNOLOGIE	FORME D'ÉNERGIE STOCKÉE	RENDEMENT ALLER-RETOUR	ORDRE DE GRANDEUR
Batterie lithium-ion	Chimique	85 à 95 %	150 à 250 Wh/kg
STEP (station de pompage)	Potentielle de pesanteur	70 à 80 %	jusqu'à plusieurs GW
Hydrogène	Chimique	25 à 35 %	33 kWh/kg d'H ₂
Volant d'inertie	Cinétique	85 à 90 %	quelques minutes
Ballon d'eau chaude	Thermique	pertes faibles sur 24 h	$Q = m \times c \times \Delta\theta$

FORMULE

Énergie stockée

$$E = U \times Q \quad E = m \times g \times h = \rho \times V \times g \times h$$

Batterie : U en volts, Q (capacité) en ampères-heures → E en Wh · **STEP** : V volume d'eau (m³), h hauteur de chute (m) → E en J.

EXEMPLE RÉSOLU

La batterie d'une voiture électrique

Une batterie fonctionne sous **U = 400 V** et a une capacité **Q = 150 Ah** ; sa masse est de **400 kg**. La voiture consomme **17 kWh aux 100 km**. On la recharge sur une borne de **11 kW** ; le rendement de charge vaut **0,90**.

a) Énergie stockée

Relation littérale $E = U \times Q$

Application numérique $E = 400 \times 150 = 60\,000 \text{ Wh}$

Résultat **E = 60 kWh**

b) Énergie massique

Relation littérale $e = E / m$

Application numérique $e = 60\,000 / 400$

Résultat **e = 150 Wh/kg**

Interprétation à comparer aux 12 000 Wh/kg du gazole : 80 fois moins.

c) Autonomie

Relation littérale $d = E / \text{consommation}$

Application numérique $d = 60 / 17 \times 100 \text{ km}$

Résultat **d ≈ 350 km**

d) Durée d'une recharge complète

Relation littérale $t = E / (\eta \times P)$

Application numérique $t = 60 / (0,90 \times 11)$

Résultat **t ≈ 6,1 h**

EXEMPLE RÉSOLU

Une STEP de montagne

Une STEP stocke $V = 1,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ d'eau dans un bassin situé $h = 900 \text{ m}$ au-dessus du bassin inférieur. Rendement du turbinage : **0,90** ; rendement du pompage : **0,87**.

a) Énergie potentielle stockée

Relation littérale $E = \rho \times V \times g \times h$

Application numérique $E = 1\,000 \times 1,0 \times 10^6 \times 9,81 \times 900$

Résultat $E \approx 8,8 \times 10^{12} \text{ J} \approx 2,45 \text{ GWh}$

b) Électricité restituée au réseau

Relation littérale $E_{\text{rest}} = 0,90 \times E$

Application numérique $E_{\text{rest}} = 0,90 \times 2,45$

Résultat $E_{\text{rest}} \approx 2,2 \text{ GWh}$

c) Électricité consommée pour remonter l'eau

Relation littérale $E_{\text{pomp}} = E / 0,87$

Application numérique $E_{\text{pomp}} = 2,45 / 0,87$

Résultat $E_{\text{pomp}} \approx 2,8 \text{ GWh}$

d) Rendement aller-retour

Relation littérale $\eta = E_{\text{rest}} / E_{\text{pomp}}$

Application numérique $\eta = 2,2 / 2,8$ (ou $0,90 \times 0,87$)

Résultat $\eta \approx 0,78$ soit **78 %**

Interprétation on pompe la nuit quand l'électricité est abondante et bon marché, on turbine aux heures de pointe.

PIÈGE À ÉVITER

Le stockage ne produit pas d'énergie

Une batterie, une STEP ou un réservoir d'hydrogène **restituent toujours moins** d'énergie qu'ils n'en ont reçu. Pour l'hydrogène : électrolyse ($\eta \approx 0,65$) puis pile à combustible ($\eta \approx 0,50$) donnent $\eta_{\text{global}} = 0,65 \times 0,50 \approx 0,33$: on récupère un tiers de l'électricité de départ.

07 Comparer les solutions : impact carbone et coût

Pour **choisir** une solution technique dans une démarche de développement durable, on compare l'énergie consommée, mais aussi les **émissions de CO₂** et le **coût**. Les émissions se calculent sur l'**analyse du cycle de vie (ACV)** : extraction des matières, fabrication, construction, fonctionnement, démantèlement et recyclage.

MOYEN DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	ÉMISSIONS SUR LE CYCLE DE VIE (G CO ₂ EQ/KWH)
Centrale au charbon	≈ 820
Centrale au gaz (cycle combiné)	≈ 490
Biomasse	≈ 230
Solaire photovoltaïque (centrale au sol)	≈ 48
Hydraulique	≈ 24
Nucléaire	≈ 12
Éolien terrestre	≈ 11

Valeurs médianes publiées par le GIEC (2014).

ORDRES DE GRANDEUR

Le mix énergétique

- Dans le **monde**, les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) fournissent encore environ **80 %** de l'énergie primaire.
- En **France**, l'électricité est produite à environ **deux tiers** par le nucléaire, puis par l'hydraulique, l'éolien et le solaire. Son contenu carbone est faible : de l'ordre de **30 à 60 g de CO₂ par kWh** selon les années.

EXEMPLE RÉSOLU

Thermique ou électrique : que choisir ?

On compare, pour **100 km**, une voiture diesel (5,0 L de gazole à **1,70 €/L**, **2,65 kg de CO₂/L**) et une voiture électrique (17 kWh à **0,25 €/kWh**, électricité française à **50 g de CO₂/kWh**).

a) Coût aux 100 km

Relation littérale Coût = quantité × prix unitaire

Application numérique diesel : $5,0 \times 1,70$; électrique : $17 \times 0,25$

Résultat diesel : **8,50 €** · électrique : **4,25 €**

b) Émissions de CO₂ à l'usage

Relation littérale $m_{CO_2} = \text{quantité} \times \text{facteur d'émission}$

Application numérique diesel : $5,0 \times 2,65$; électrique : $17 \times 0,050$

Résultat diesel : **13,3 kg** · électrique : **0,85 kg**

c) Conclusion argumentée

Interprétation à l'usage et en France, la voiture électrique coûte deux fois moins cher et émet environ 15 fois moins de CO₂. Mais la fabrication de sa batterie émet plusieurs tonnes de CO₂ : un bilan complet doit se faire sur l'ACV et sur toute la durée de vie du véhicule.

PIÈGE À ÉVITER

Le résultat dépend du mix électrique

Avec une électricité produite au charbon ($\approx 820 \text{ g/kWh}$), la même voiture électrique émettrait $17 \times 0,820 \approx 14 \text{ kg}$ de CO₂ aux 100 km, autant que la voiture diesel. Une conclusion n'est valable que **pour les données de l'énoncé**.

08 Bilan : de la maîtrise du feu au mix bas carbone

DATE	SOURCE DOMINANTE	CONVERTISSEUR CLÉ ET INVENTEUR	PUISSANCE TYPIQUE
- 400 000 ans	Bois	Foyer	quelques kW thermiques
- 3 500 à - 1 400	Muscles, vent, eau	Roue, voile, chadouf (Mésopotamie, Égypte)	0,03 à 1 kW
Antiquité – Moyen Âge	Muscles, eau, vent	Moulins (Vitruve)	0,1 à 5 kW
850 – 1206	Eau, animaux	Pompes, norias, automates (Banū Mūsā, Al-Battani, Al-Jazari)	0,1 à 1 kW
1712 – 1769	Charbon	Machine à vapeur (Newcomen, Watt)	10 à 1 000 kW
1831 – 1882	Charbon, eau	Alternateur, moteur (Faraday, Gramme, Edison, Tesla)	jusqu'à quelques MW
1859 – 1897	Pétrole	Moteur à combustion (Otto, Benz, Diesel)	10 kW à 100 MW
1951	Uranium	Réacteur nucléaire (Fermi)	900 à 1 650 MW
1954 → aujourd'hui	Mix diversifié	Éolienne, panneau PV, batterie	3 à 15 MW par éolienne

SYNTHÈSE

Conclusion du chapitre

Le progrès énergétique ne consiste pas seulement à découvrir de nouvelles sources : il repose sur la capacité à **convertir** l'énergie, **améliorer les rendements** (de 1 % chez Newcomen à 95 % pour un moteur électrique), **transporter** la puissance et, aujourd'hui, **stocker** l'énergie et **réduire les émissions de CO₂**.

En quelques siècles, la puissance d'une machine est passée de **100 W** (un humain) à plus de **1 000 MW** (un réacteur nucléaire) : un facteur **dix millions**.

PARTIE IV

S'entraîner pour le bac

01 Formulaire complet du chapitre

À connaître par cœur, avec les unités. Les données numériques (PCI, ρ , c , facteurs d'émission...) sont toujours fournies dans l'énoncé.

SITUATION	RELATION	GRANDEURS ET UNITÉS
Énergie et puissance	$E = P \times t$	E (J) ; P (W) ; t (s) — ou E (kWh) ; P (kW) ; t (h)
Rendement	$\eta = P_u / P_a = E_u / E_a$	sans unité ; $\eta_{\text{global}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \dots$
Pertes	$E_{\text{pertes}} = E_a - E_u$	J ou kWh
Électrique	$P = U \times I (\times \cos \varphi)$	U (V) ; I (A) ; P (W)
Effet Joule	$P_J = R \times I^2$	R (Ω) ; I (A)
Translation	$P = F \times v$	F (N) ; v (m/s)
Rotation	$P = C \times \omega$; $\omega = 2\pi \times N / 60$	C (N·m) ; ω (rad/s) ; N (tr/min)
Soulever une charge	$W = m \times g \times h$	m (kg) ; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; h (m)
Combustible	$E = m \times \text{PCI}$	PCI (J/kg ou MJ/kg)
Chauffer un corps	$Q = m \times c \times (\theta_f - \theta_i)$	c (J/(kg·°C)) ; θ (°C)
Chute d'eau	$P_{\text{hyd}} = \rho \times g \times Q_v \times h$	ρ (kg/m ³) ; Q_v (m ³ /s) ; h (m)
Vent	$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$	$A = \pi \times R^2$ (m ²) ; v (m/s) ; Betz : 59 % max
Panneau PV	$P = \eta \times G \times S$	G (W/m ²) ; S (m ²)
Batterie	$E = U \times Q$	U (V) ; Q (Ah) → E (Wh)
Facteur de charge	$FC = E_{\text{réelle}} / (P_{\text{nom}} \times t)$	sans unité ; $t = 8\,760$ h sur un an
Émissions de CO ₂	$m_{\text{CO}_2} = E \times \text{facteur d'émission}$	facteur en g CO ₂ /kWh

02 Exercice type bac : le refuge de montagne

EXERCICE TYPE BAC

Un refuge autonome en énergie

Un refuge de haute montagne, non raccordé au réseau, est alimenté par des **panneaux photovoltaïques** associés à une **batterie**. L'ancien système utilisait un **groupe électrogène diesel**. On cherche à justifier ce choix sur les plans **technique**, **économique** et **environnemental**.

Données

- Consommation électrique du refuge : **4,8 kWh par jour**, fournie par un onduleur de rendement **0,95**.
- Batterie : **48 V, 300 Ah** ; on ne la décharge pas à plus de **80 %**. Rendement de charge : **0,90**.
- Panneaux : **3,0 kW crête** ; en hiver, ils produisent en moyenne **2,5 kWh par kW crête et par jour**.
- Groupe électrogène : **0,35 L de gazole par kWh** produit ; gazole à **1,70 €/L** ; **2,65 kg de CO₂/L**.

Questions

- Q1. Calculer l'énergie stockée dans la batterie, puis l'énergie réellement utilisable.
- Q2. Calculer l'énergie que la batterie doit fournir chaque jour, puis l'autonomie du refuge sans soleil.
- Q3. Vérifier que les panneaux suffisent à recharger la batterie chaque jour en hiver.
- Q4. Calculer, sur un an, la consommation de gazole, le coût et les émissions de CO₂ de l'ancien groupe électrogène.
- Q5. Conclure de façon argumentée.

CORRIGÉ DÉTAILLÉ

Le refuge de montagne

Q1. Énergie stockée et énergie utilisable

Relation littérale $E = U \times Q$; $E_{\text{util}} = 0,80 \times E$

Application numérique $E = 48 \times 300 = 14\,400 \text{ Wh}$; $E_{\text{util}} = 0,80 \times 14,4$

Résultat $E = 14,4 \text{ kWh}$; $E_{\text{util}} \approx 11,5 \text{ kWh}$

Q2. Énergie fournie par la batterie et autonomie

Relation littérale $E_{\text{batt}} = E_{\text{conso}} / \eta_{\text{ond}}$; autonomie = $E_{\text{util}} / E_{\text{batt}}$

Application numérique $E_{\text{batt}} = 4,8 / 0,95 \approx 5,05 \text{ kWh/jour}$; autonomie = $11,5 / 5,05$

Résultat autonomie $\approx 2,3 \text{ jours}$

Interprétation le refuge tient environ deux jours sans soleil.

Q3. Recharge en hiver

Relation littérale $E_{\text{PV}} = P_c \times 2,5$; $E_{\text{stockée}} = 0,90 \times E_{\text{PV}}$

Application numérique $E_{\text{PV}} = 3,0 \times 2,5 = 7,5 \text{ kWh}$; $E_{\text{stockée}} = 0,90 \times 7,5$

Résultat $E_{\text{stockée}} = 6,75 \text{ kWh} > 5,05 \text{ kWh}$

Interprétation les panneaux couvrent les besoins quotidiens, avec une marge pour recharger la batterie après un jour couvert.

Q4. Bilan annuel du groupe électrogène

Relation littérale $V = 4,8 \times 0,35 \times 365$; $\text{Coût} = V \times 1,70$; $m_{\text{CO}_2} = V \times 2,65$

Application numérique $V = 1,68 \text{ L/jour} \times 365 \approx 613 \text{ L}$; $\text{Coût} = 613 \times 1,70$; $m_{\text{CO}_2} = 613 \times 2,65$

Résultat $V \approx 613 \text{ L}$; $\text{Coût} \approx 1\,040 \text{ €}$; $m_{\text{CO}_2} \approx 1\,600 \text{ kg}$

Q5. Conclusion

Interprétation la solution photovoltaïque + batterie est techniquement adaptée (2,3 jours d'autonomie, recharge assurée en hiver), économise environ 1 000 € de gazole par an — sans compter son acheminement en montagne — et évite environ 1,6 tonne de CO_2 par an. Le groupe peut être conservé en secours pour les longues périodes sans soleil.

SYNTHÈSE

Les 5 réflexes pour réussir un exercice d'énergie

- **Tracer la chaîne** de puissance et placer les rendements sur chaque bloc.
- **Convertir** toutes les données (min $\rightarrow$ h ou s, % $\rightarrow$ décimal, kW $\rightarrow$ W) avant de calculer.
- Rédiger en **3 étapes** : relation littérale, application numérique, résultat avec unité.
- **Vérifier l'ordre de grandeur** : un rendement est toujours inférieur à 1, une puissance utile inférieure à la puissance absorbée.
- **Conclure** avec les chiffres, en citant les trois critères : technique, économique, environnemental.